

На правах рукописи

Карсканов Иван Валерьевич

**Эффекты межэлектронного взаимодействия в
квантовых гальваномагнитных явлениях в
полупроводниковых гетероструктурах p - и
 n -типа**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург

2009

Работа выполнена в лаборатории полупроводников и полуметаллов Института физики металлов УрО РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Харус Герман Иосифович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Германенко Александр Викторович

доктор физико-математических наук,
профессор Куркин Михаил Иванович

Ведущая организация: Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
РАН, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «_____» _____ 200__ г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 при ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького», по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького».

Автореферат разослан «_____» _____ 200__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Н.В. Кудреватых

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Большой интерес к электронным системам с пониженной размерностью связан со значительным развитием технологии их изготовления. В последнее время были разработаны методы промышленного производства полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток, а также систем квантовых проволок и точек. Благодаря этому появилось большое количество новых устройств, таких как полупроводниковые лазеры на сверхрешетках, светодиоды. Для получения устройств с необходимыми параметрами необходимо глубокое понимание физических процессов, происходящих в двумерных системах. Помимо широкого практического применения, двумерные системы интересны с точки зрения фундаментальной науки. В них были обнаружены квантовые эффекты на макроскопическом уровне, например, целочисленный и дробный квантовый эффект Холла (КЭХ), квантовые интерференционные эффекты в проводимости, квантовые фазовые переходы. И поэтому изучение двумерных электронных систем составляет фундаментальную задачу физики конденсированного состояния и отнесено к приоритетным направлениям физических исследований.

В последнее время, благодаря значительному прогрессу в технологии изготовления полупроводниковых гетероструктур, большое внимание уделяется исследованию систем, в которых важную роль играет межэлектронное взаимодействие. Одним из наиболее ярких эффектов, обусловленных сильным электрон-электронным взаимодействием и локализацией носителей заряда, является дробный квантовый эффект Холла. Данная диссертация посвящена проблеме, находящейся в центре теоретических и экспериментальных исследований последних лет, а именно, исследованию эффектов межэлектронного взаимодействия в двумерных системах делокализованных носителей (фермижидкостное взаимодействие).

Целью настоящей работы является систематическое исследование эффектов электрон-электронного ($e-e$) взаимодействия в гальваномагнитных явлениях в двумерных полупроводниковых гетероструктурах p - и n -типа, как в классически слабых магнитных полях (квантовые интерференционные эффекты),

так и в квантующих (режим квантового эффекта Холла).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые проведен анализ особенностей квантовых интерференционных эффектов в двумерных системах с большим анизотропным g -фактором (системы $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$). В таких системах необходимо учитывать сильное зеемановское расщепление уровней энергии электронов, приводящее к существенной зависимости интерференционного e - e вклада от магнитного поля.
2. Исследование гетероструктур $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ в широком интервале температур позволило на одном и том же образце наблюдать интерференционный вклад в проводимость от межэлектронного взаимодействия в различных режимах: при низких температурах - в диффузионном режиме, при высоких температурах - в баллистическом режиме, а также в промежуточной области.
3. Сравнительный анализ температурных зависимостей ширины перехода плато-плато в режиме квантового эффекта Холла для двумерных гетероструктур $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ и $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ позволил выявить принципиальную разницу в экспериментальных проявлениях квантового фазового перехода в зависимости от характера примесного потенциала, а именно, от соотношения характерного масштаба потенциала d и магнитной длины λ : короткодействующий ($d \ll \lambda$) или плавный ($d \gg \lambda$) примесный потенциал.

Практическая ценность проведенных исследований состоит в том, что выявлена принципиальная недостаточность одноэлектронного подхода при интерпретации температурных и магнитолевых зависимостей продольного и холловского сопротивлений в двумерных полупроводниковых гетероструктурах. Обоснована необходимость учета межэлектронного взаимодействия как в области квантовых интерференционных эффектов в классически слабых магнитных полях, так и в области квантовых фазовых переходов плато-плато в режиме целочисленного квантового эффекта Холла.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Установлено, что параболическое отрицательное магнитосопротивление, наблюдаемое во всех исследованных гетероструктурах в магнитных полях $B \gg B_{tr}$ ($B_{tr} = \hbar/4eD\tau$, D - коэффициент диффузии, τ - время релаксации импульса) обусловлено квантовым интерференционным вкладом в проводимость от модифицированного беспорядком межэлектронного взаимодействия. Экстраполяция этого вклада из области сильных магнитных полей к $B = 0$ дает возможность определить микроскопические характеристики двумерных систем: параметр ферми-жидкостного взаимодействия и время сбоя фазы волновой функции из-за неупругих столкновений электронов. В гетероструктурах $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ с аномально большим g - фактором ($g \approx 20$) обнаружена существенная зависимость e - e вклада в проводимость от магнитного поля, обусловленная эффектом Зеемана.

2. В гетероструктурах $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ обнаружена немонотонная температурная зависимость сопротивления ($d\rho/dT > 0$ при $T \leq 1.5\text{K}$, $d\rho/dT < 0$ при $T > 1.5\text{K}$), вблизи перехода металл-диэлектрик ($E_F\tau/\hbar \cong 1$). Показано, что она обусловлена перенормировкой параметра ферми-жидкостного взаимодействия при понижении температуры согласно представлениям теории ренорм-группы.

Низкотемпературное положительное магнитосопротивление и, как следствие, установление в достаточно больших магнитных полях диэлектрического ($d\rho/dT < 0$) поведения $\rho(T)$ во всем исследованном интервале температур обусловлены подавлением большей части интерференционного e - e вклада в проводимость магнитным полем из-за сильного эффекта Зеемана в слоях $p - Ge$.

3. Обнаружено диэлектрическое ($d\rho/dT < 0$) поведение сопротивления в гетероструктурах $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ в широком интервале температур ($1.6 \leq T \leq 70\text{ K}$). Показано, что оно определяется квантовым интер-

ференционным вкладом за счет е-е взаимодействия как в диффузионном ($k_B T \tau / \hbar \ll 1$), так и в баллистическом режимах ($k_B T \tau / \hbar \gg 1$). Наблюдаемый с ростом температуры существенный сдвиг максимума холловской проводимости $\sigma_{xy}(B)$ в сторону больших магнитных полей связан с температурной зависимостью времени релаксации $\tau(T)$, обусловленной е-е взаимодействием в баллистическом режиме.

4. Наблюдаемая в режиме квантового эффекта Холла степенная температурная зависимость ширины перехода плато-плато $W \sim T^\kappa$ (с $\kappa = 0.48$) для гетероструктур $n - In_y Ga_{1-y} As / GaAs$ соответствует результатам современной теории скейлинга для короткодействующего примесного потенциала. С другой стороны, линейная температурная зависимость $W = \alpha T + \beta$, обнаруженная в гетероструктурах $p - Ge / Ge_{1-x} Si_x$, соответствует конечному уширению полосы делокализованных состояний даже при $T = 0$ и может быть объяснена влиянием кулоновского взаимодействия электронов на экранирование флуктуаций плавного примесного потенциала.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих конференциях: VIII Российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург, 2007), XVI и XVII Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург, 2006 и 2008), 15 международный симпозиум "Nanostructures: Physics and Technology" (Новосибирск, 2007), 34 совещание по физике низких температур (НТ-34, Ростов на Дону, 2006), VI и VII Молодежный семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2005 и 2006).

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 5 статей в реферируемых российских и зарубежных журналах и 13 тезисов докладов, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, пять глав, основные выводы и два приложения. Объем диссертации составляет _____ страницы, включая _____ рисунков. Список литературы содержит _____ наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований. Сформулирована цель и практическая значимость работы, а также приведены основные результаты работы.

Первая глава посвящена рассмотрению теории квантовых эффектов в проводимости двумерных систем в классически слабых и сильных магнитных полях.

В первой части рассмотрены основные результаты теории квантовых поправок [1]. Для начала приведены результаты классической теории проводимости, и указаны пределы её применимости. Далее описана квантовая интерференционная поправка к проводимости ($\Delta\sigma^{WL}$) и температурная зависимость времени релаксации фазы, которая приводит к логарифмической зависимости $\Delta\sigma^{WL}$ от температуры. В магнитных полях происходит подавление квантовой интерференционной поправки, это выражается в виде отрицательного магнитосопротивления. Учет межэлектронного взаимодействия приводит к дополнительному вкладу в проводимость. Затем приведены результаты теоретических расчетов для квантовой поправки к проводимости за счет электрон-электронного взаимодействия $\Delta\sigma^{ee}$. В сильных магнитных полях за счет эффекта Зеемана происходит подавление вклада триплетного канала в поправку от межэлектронного взаимодействия.

Вторая часть первой главы посвящена общим теоретическим представлениям о квантовом эффекте Холла [2].

Вторая глава посвящена описанию методики эксперимента. Первая часть этой главы посвящена описанию автоматизированной экспериментальной установки, приведена её блок-схема. Исследования гальваномагнитных явлений проводились на постоянном токе в интервале температур $0.05 \div 70$ К в стационарных магнитных полях напряженностью до 12 Т. Для получения низких температур использовались три различные охлаждающие системы: рефрижератор растворения He^3 в He^4 для получения сверхнизких температур в интервале от 0.05 до 0.4 К, температурная вставка He^3 для получения температур от 0.4 до 1.2 К и температурная вставка He^4 для интервала

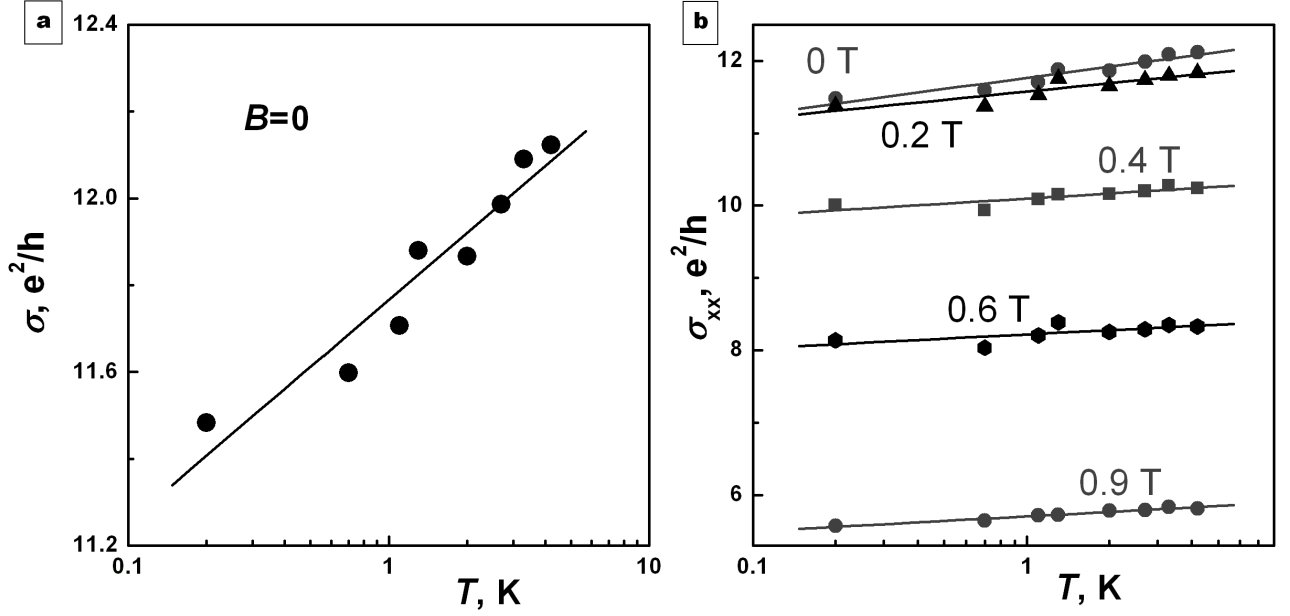


Рис. 1. Температурные зависимости проводимости σ_{xx} гетероструктуры $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ при $B = 0$ [a] и при фиксированных значениях магнитных полей [b].

температур от 1.5 до 100 K.

Во второй части Главы 2 приводится информация об исследуемых образцах. В настоящей работе исследованы гетероструктуры с электронным двумерным газом в двойных квантовых ямах $In_yGa_{1-y}As/GaAs$ и дырочным двумерным газом в многослойных гетероструктурах $Ge/Ge_{1-x}Si_x$.

Третья глава посвящена исследованию квантовых поправок к проводимости в гетероструктурах $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$.

Зависимость проводимости от температуры $\sigma(T)$ подчиняется логарифмическому закону (см. рис. 1), как при $B = 0$, так и в фиксированных магнитных полях, что свидетельствует о присутствии вкладов квантовых поправок. В магнитных полях вплоть до $\omega_c\tau = 1$ наблюдается отрицательное магнитосопротивление (рис. 2), которое, начиная с некоторого значения B , пропорционально B^2 в соответствии с выражением [3]:

$$\rho_{xx}(B) = \frac{1}{\sigma_0} + \frac{[(\omega_c\tau)^2 - 1]\Delta\sigma^{ee}(B)}{\sigma_0^2}, \quad (1)$$

где ω_c - циклотронная частота, τ - время релаксации импульса. При $\omega_c\tau = 1$ ясно видна точка, в которой сопротивление не зависит от температуры, и, как

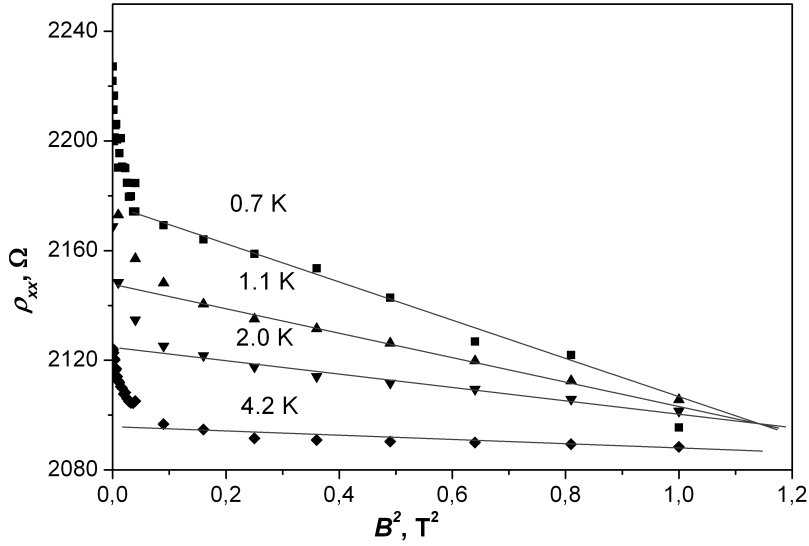


Рис. 2. Зависимость сопротивления ρ_{xx} гетероструктуры $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ от квадрата магнитного поля B^2 при фиксированных температурах T . Линиями показана экстраполяция к $B = 0$. $B_0 \approx 1$ Тл.

следует из (1), равно обратной друдевской проводимости: $\rho_{xx} = 1/\sigma_0$. Значение магнитного поля, при котором имеет место температурно-независимая точка, $B_0 = (1, 0 \pm 0, 1)$ Тл. Отсюда мы можем определить такие параметры образца, как классическая проводимость $\sigma_0 = 12.3 e^2/h$, подвижность носителей $\mu = (1.0 \pm 0.1) \cdot 10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и время свободного пробега $\tau = (4.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-13} \text{ с}$.

Проводя аппроксимацию из области сильных магнитных полей, мы определили величину вклада электрон-электронного взаимодействия в проводимость с учетом эффекта Зеемана $\Delta\sigma_{\infty}^{ee}$ (рис. 3а, кривая 2). Далее, по температурной зависимости полученных данных согласно выражению [1]:

$$\Delta\sigma_{\infty}^{ee}(T) = \frac{e^2}{\pi h} (1 - \lambda) \ln \frac{kT\tau}{\hbar}, \quad (2)$$

где $\lambda = \ln(1 + F_0^{\sigma})/F_0^{\sigma} - 1$ - амплитуда ферми-жидкостного взаимодействия, F_0^{σ} - константа взаимодействия, найдены значения параметра $F_0^{\sigma} = -0,51 \pm 0.04$.

Пределы сильных магнитных полей и нулевого магнитного поля связаны, причем эта связь определяется только константой электрон-электронного взаимодействия. Это позволило нам определить вклад электрон-электронного

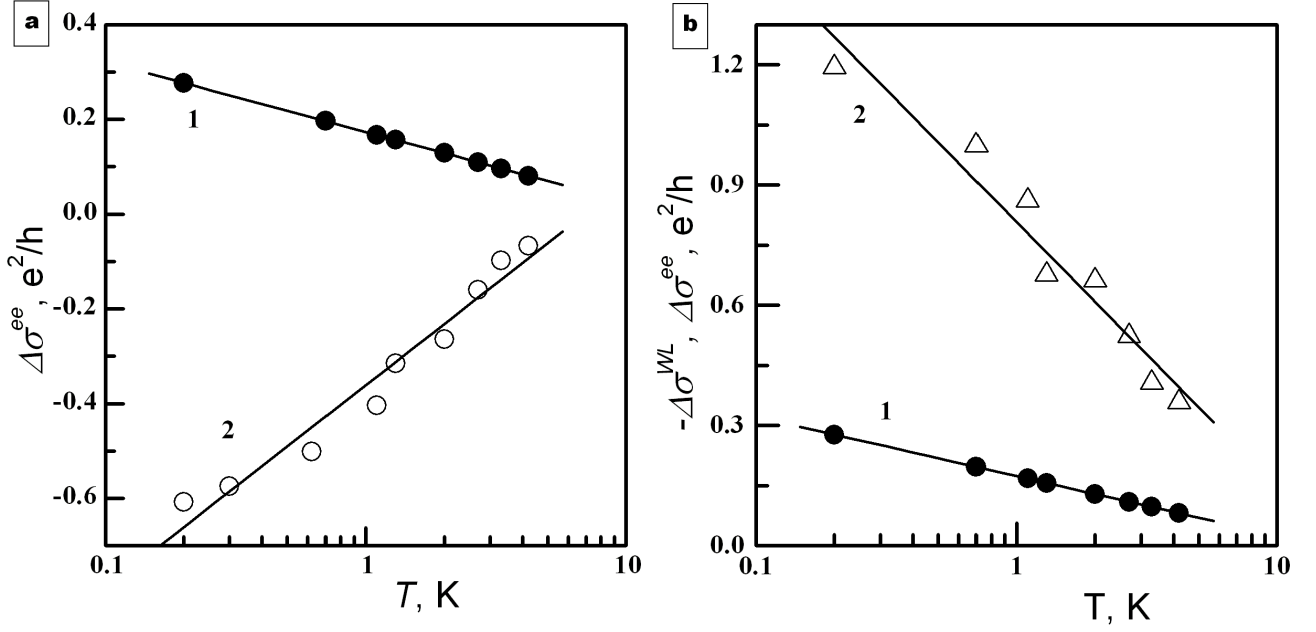


Рис. 3. Температурные зависимости вкладов электрон-электронного взаимодействия в проводимость гетероструктуры $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$: [а] $\Delta\sigma_0^{ee}$ - вклад в нулевом магнитном поле (1) и $\Delta\sigma_\infty^{ee}$ - вклад в сильных магнитных полях (2); [б] вклады в проводимость при $B = 0$ от электрон-электронного взаимодействия $\Delta\sigma_0^{ee}$ (1) и от слабой локализации $\Delta\sigma^{WL}$ (2)

взаимодействия в проводимость при $B = 0$:

$$\sigma_0^{ee}(T) = \frac{e^2}{\pi\hbar}(1 - 3\lambda) \ln \frac{kT\tau}{\hbar}. \quad (3)$$

На рис. 3а видно, что значения вклада $\Delta\sigma_0^{ee}$ в нулевом магнитном поле (кривая 1 на рис. 3а) и полученные экстраполяцией к $B = 0$ из области сильных магнитных полей, $\Delta\sigma_\infty^{ee}$ (кривая 2 на рис. 3а) имеют разные знаки и разные знаки температурного коэффициента, т.е. вследствие зеемановского расщепления вклад электрон-электронного взаимодействия в магнитопроводимость меняет знак.

По формуле $\sigma_{xx} = \sigma_0 + \Delta\sigma_0^{ee} + \Delta\sigma^{WL}$ находим значение $\Delta\sigma^{WL}$ при $B = 0$. На рис. 3б представлены температурные зависимости полученных вкладов слабой локализации (кривая 2 на рис. 3б) и электрон-электронного взаимодействия (кривая 1 на рис. 3б) в нулевом магнитном поле. Видно, что $|\Delta\sigma^{ee}| \simeq |\Delta\sigma^{WL}|/4$.

При $B = 0$ вклад в проводимость от квантовой интерференционной по-

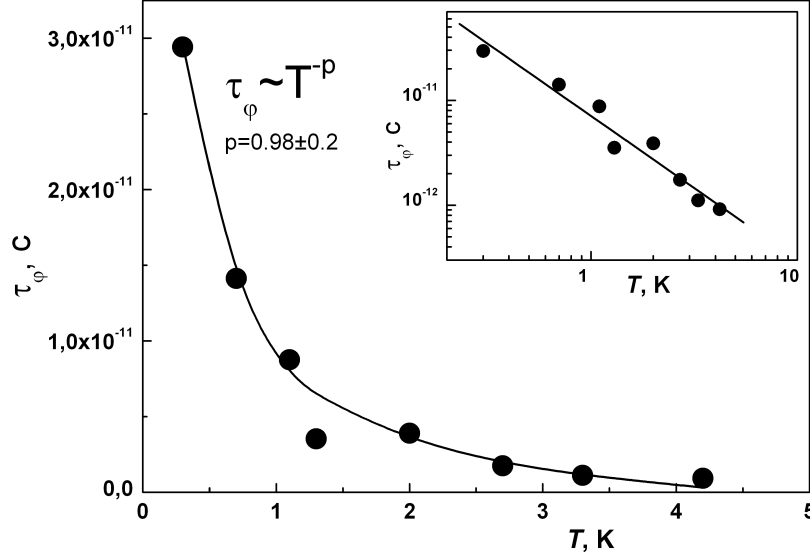


Рис. 4. Температурная зависимость времени сбоя фазы τ_φ . На вставке тот же график в двойном логарифмическом масштабе.

правки выражается следующим образом:

$$\Delta\sigma^{WL} = \alpha \frac{e^2}{\pi h} \ln \frac{\tau_\varphi}{\tau}, \quad (4)$$

где α - префактор, число близкое к единице. Отсюда находим значения времени сбоя фазы τ_φ электронной волны (см. рис. 4), для которого справедлива степенная температурная зависимость. Определенный здесь показатель степени $p = -0.98$, что близко к теоретическому значению $p = 1$ для неупругой релаксации фазы за счет электрон-электронного взаимодействия (механизм Найквиста) в двумерных системах [1].

Во второй части третьей главы приводятся экспериментальные данные для ещё одной гетероструктуры на основе $p\text{-}Ge/Ge_{1-x}Si_x$. Нами проводились измерения продольного и поперечного сопротивления в перпендикулярном магнитном поле $B \leq 5$ Тл при температурах от 0.2 до 4.2 К. Для образца с концентрацией носителей $1.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и подвижностью $\mu_p = 4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (параметр $E_F\tau/\hbar = 0.75$) наблюдается немонотонное низкотемпературное поведение сопротивления (рис. 5а): увеличение $\rho(T)$ с понижением температуры от 4.2 до 1.5 К (локализация) и уменьшение $\rho(T)$ при понижении T от 1.5 до 0.3 К (антилокализация). В области антилокализации при $T \leq 1$ К проводимость логарифмически зависит от температуры (см. рис. 5а). Во

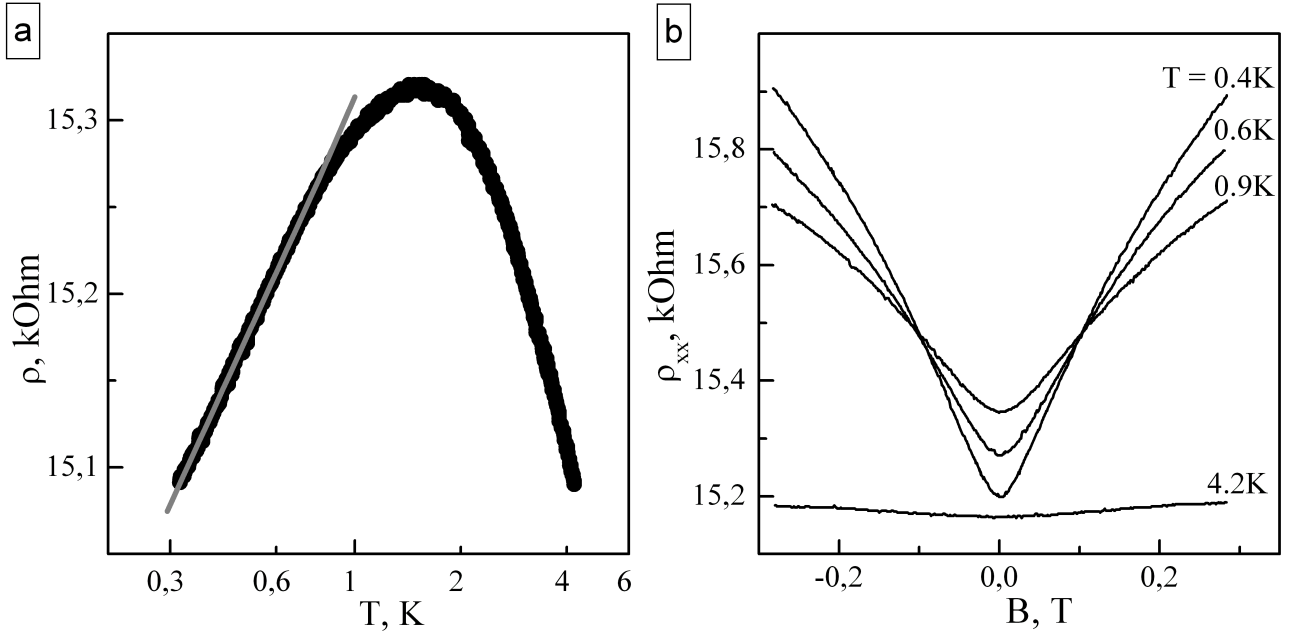


Рис. 5. [a] - температурная зависимость сопротивления без магнитного поля, по оси абсцисс логарифмический масштаб, [b] - зависимость сопротивления от перпендикулярного магнитного поля при различных температурах.

всем интервале температур наблюдается положительное магнитосопротивление, резко усиливающееся при понижении T (рис. 5b). При низких температурах $T < 1$ К в полях $B < 0.3$ Тл магнитосопротивление $\Delta\rho_{xx}$ является почти универсальной функцией отношения B/T (рис. 6a).

Наблюдаемые зависимости сопротивления $\rho(B, T)$ можно сопоставить с квантовыми поправками к двумерной проводимости за счет эффектов слабой локализации $\Delta\sigma^{WL}$ и электрон-электронного взаимодействия $\Delta\sigma^{ee}$.

Проведено разделение квантовых интерференционных вкладов в проводимость от эффекта слабой локализации и от модифицированного беспорядком электрон-электронного (e-e) взаимодействия. При учете сильного зеемановского расщепления уровней энергии дырок выделены вклады синглетного ($S = 0$) и триплетного ($S = 1$) каналов в e-e квантовой поправке. Показано, что необычное поведение e-e квантовой поправки, соответствующее «антилокализации», обусловлено преобладанием вклада триплетного канала из-за относительно большой величины параметра ферми - жидкостного взаимодействия $|F_0^\sigma| \approx 0.6 \pm 0.1$.

Наблюдаемое немонотонное поведение $\rho(T)$, а именно, переход от диэлек-

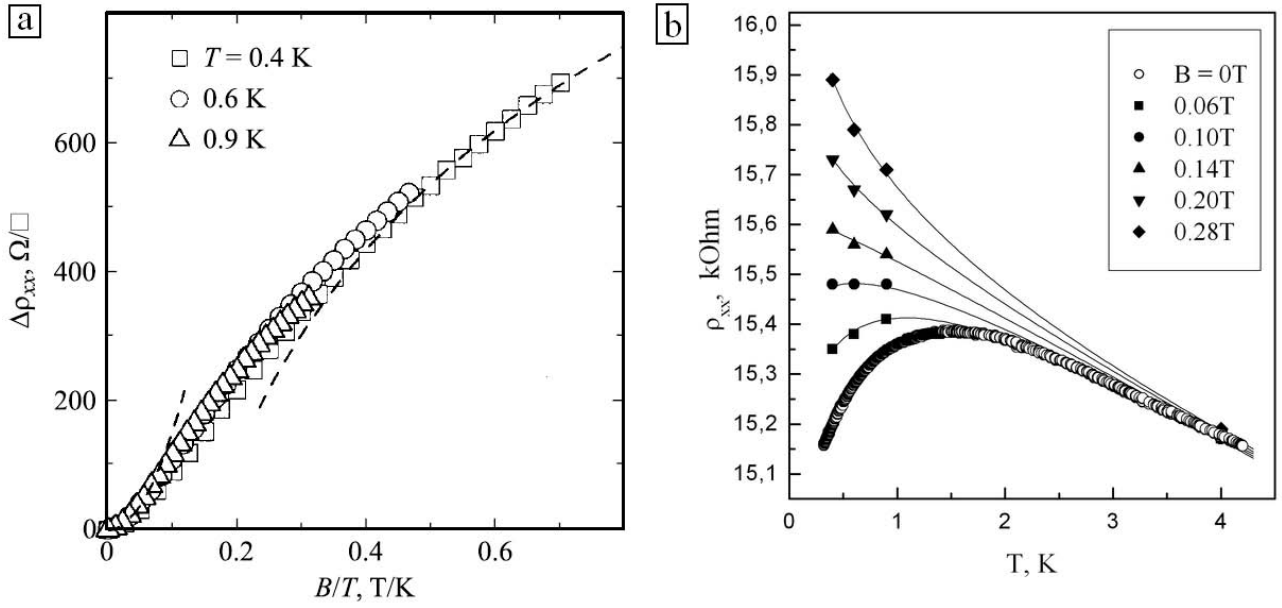


Рис. 6. [a] - магнитосопротивление как функция от B/T . Пунктирными линиями показаны подгонки при помощи теоретических выражений в пределах слабых и сильных магнитных полей, [b] - температурные зависимости сопротивления в фиксированных магнитных полях.

трического ($d\rho/dT < 0$) к «металлическому» ($d\rho/dT > 0$) поведению с понижением температуры, мы связываем с усилением роли триплетного канала в е-е квантовой поправке к проводимости. Увеличение вклада триплетного канала по мере понижения температуры обусловлено, по-видимому, предсказанной в теории Филькенштейна [4] перенормировкой параметра электрон-электронного взаимодействия, особенно существенной для 2D-систем в окрестности концентрационного перехода металл - диэлектрик ($E_F\tau/\hbar \approx 1$). Зеемановское расщепление уровней энергии электрона в магнитном поле приводит к эффективному подавлению триплетного канала, что восстанавливает диэлектрическое поведение $\rho(T)$ вплоть до самых низких температур (рис. 6b).

В **Четвертой главе** рассматриваются квантовые интерференционные эффекты в проводимости гетероструктур $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$.

На рис. 7а представлена температурная зависимость сопротивления в интервале от 2 К до 70 К при отсутствии магнитного поля. Температурная зависимость сопротивления $\rho(T)$ имеет диэлектрический характер ($d\rho/dT < 0$) во всем интервале T . Обычно в полупроводниках такое поведение $\rho(T)$ обусловлено температурной зависимостью концентрации электронов $n(T)$. Но прове-

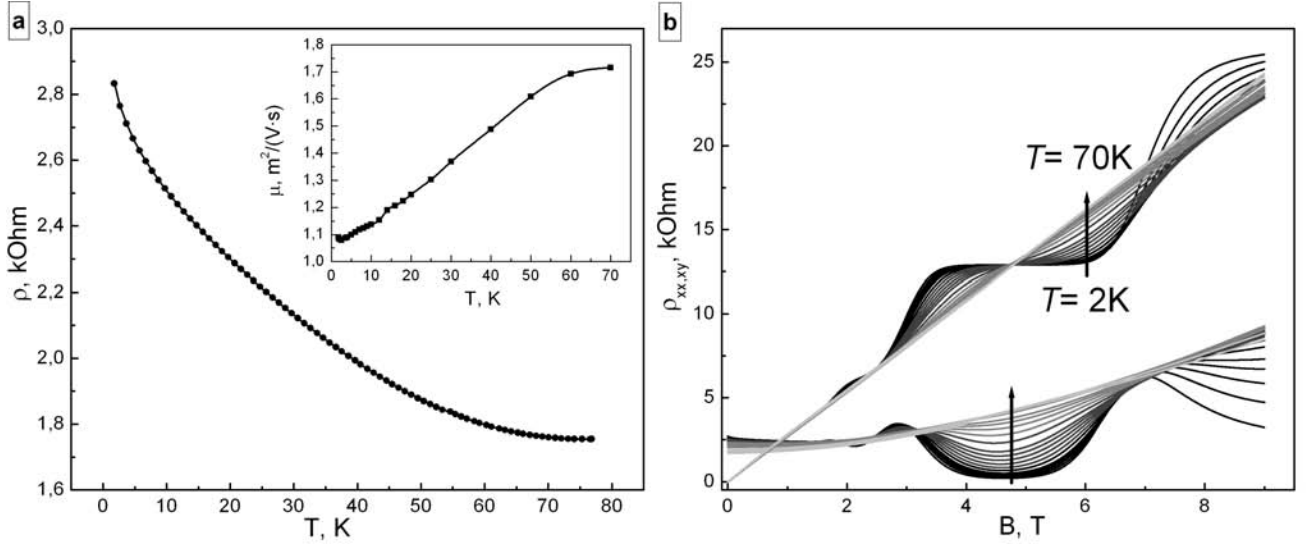


Рис. 7. [a] Зависимость сопротивления образца $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ от температуры. На вставке - температурная зависимость эффективной подвижности носителей заряда, определенной по положению максимума $\sigma_{xy}(B)$ при разных T . [b] - Экспериментальные магнитополевые зависимости $\rho_{xx}(B)$ и $\rho_{xy}(B)$ при различных температурах.

денные нами измерения сопротивления в магнитном поле при фиксированных температурах показали, что $\rho_{xy}(T)$ в слабых магнитных полях ($\mu B \ll 1$) незначительно меняется с температурой (рис. 7b). Следовательно, коэффициент Холла ($R_H(T) \sim 1/en(T)$) практически не меняется при изменении температуры, и объяснить наблюдаемую температурную зависимость $\rho(T)$ за счет изменения концентрации электронов в системе нельзя. Мы полагаем, что необычное поведение $\rho(T)$ (рост подвижности $\mu(T)$ с ростом температуры) обусловлено вкладом в проводимость за счет межэлектронного взаимодействия в баллистическом режиме ($kT\tau/\hbar > 1$) [5]:

$$\Delta\sigma_{ball}^{ee} = \frac{e^2}{\pi h} \left(1 + \frac{3F_0^\sigma}{1 + F_0^\sigma} \right) \frac{kT\tau}{\hbar}. \quad (5)$$

Рассматриваемая система $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ представляет собой двойную квантовую яму. В ней заполнены два уровня пространственного квантования: симметричный и антисимметричный. Если подвижности электронов, относящихся к разным подзонам пространственного квантования, различны, то магнитополевые зависимости сопротивления и коэффициента Холла будут иметь вид, типичный для случая двух типов носителей заряда (рис. 8). Теоретические формулы для $\rho_{xx}(B)$ и $R_H(B)$ приведены в приложении Б. Нами была

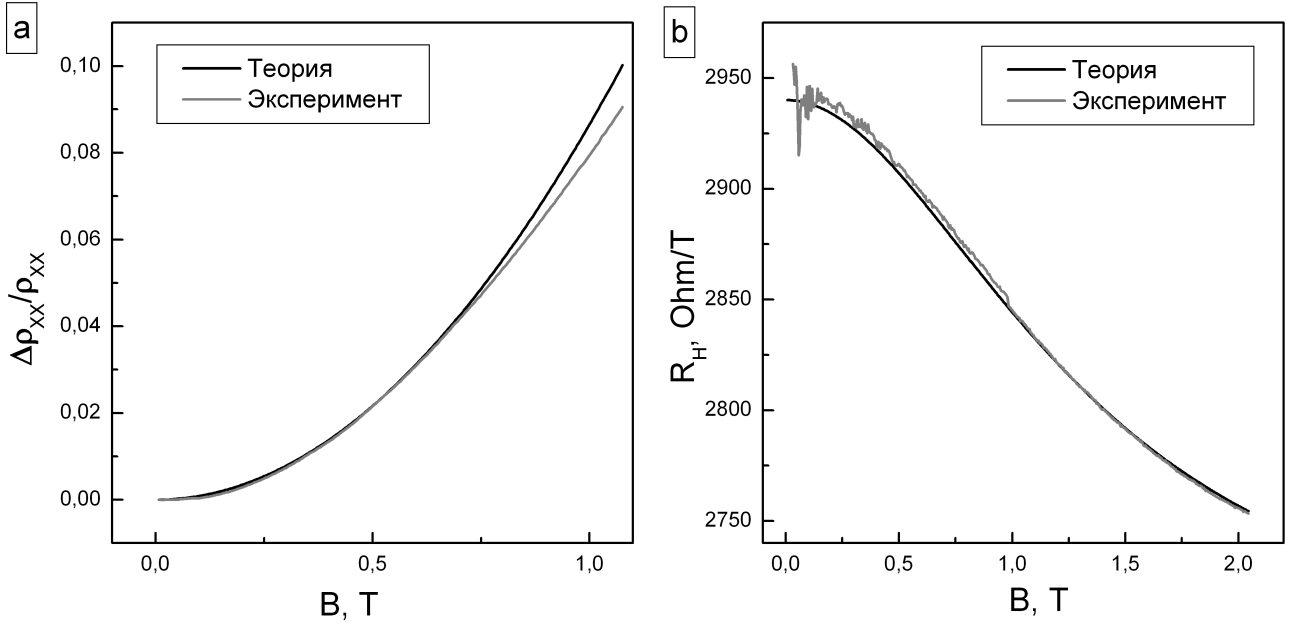


Рис. 8. Экспериментальные и теоретические зависимости, характерные для случая двух типов носителей заряда. Двойная квантовая яма $In_yGa_{1-y}As/GaAs$, температура 70 К: [a] - относительное изменение сопротивления в магнитном поле, [b] - зависимость коэффициента Холла от магнитного поля.

проведена обработка экспериментальных данных в интервале температур от 20 до 70 К для получения таких параметров как концентрация и подвижность для каждого типа носителей заряда. Для этого проводилась аппроксимация экспериментально полученных зависимостей $(\rho_{xx}(B) - \rho_{xx}(0))/\rho_{xx}(0)$ и $R_H(B)$ в слабых магнитных полях ($\omega_c\tau < 1$). При более низких температурах значительно возрастал вклад в проводимость от слабой локализации, который также существенно влияет на магнитосопротивление. Кроме того, разность значений подвижности при понижении температуры уменьшается, что приводит к снижению точности расчетов. Поэтому при температурах ниже 20 К не удалось произвести разделение вкладов в проводимость от двух типов носителей заряда. Результаты расчетов представлены на рис. 9.

Видно, что концентрации электронов n_1 и n_2 практически не зависят от температуры. Естественнo предположить, что n_1 - концентрация электронов в нижней (симметричной) подзоне, а n_2 - в верхней (антисимметричной) подзоне в двойной квантовой яме. Экспериментально найденные значения n_1 и n_2 находятся в хорошем согласии со значениями, рассчитанными путем самосо-

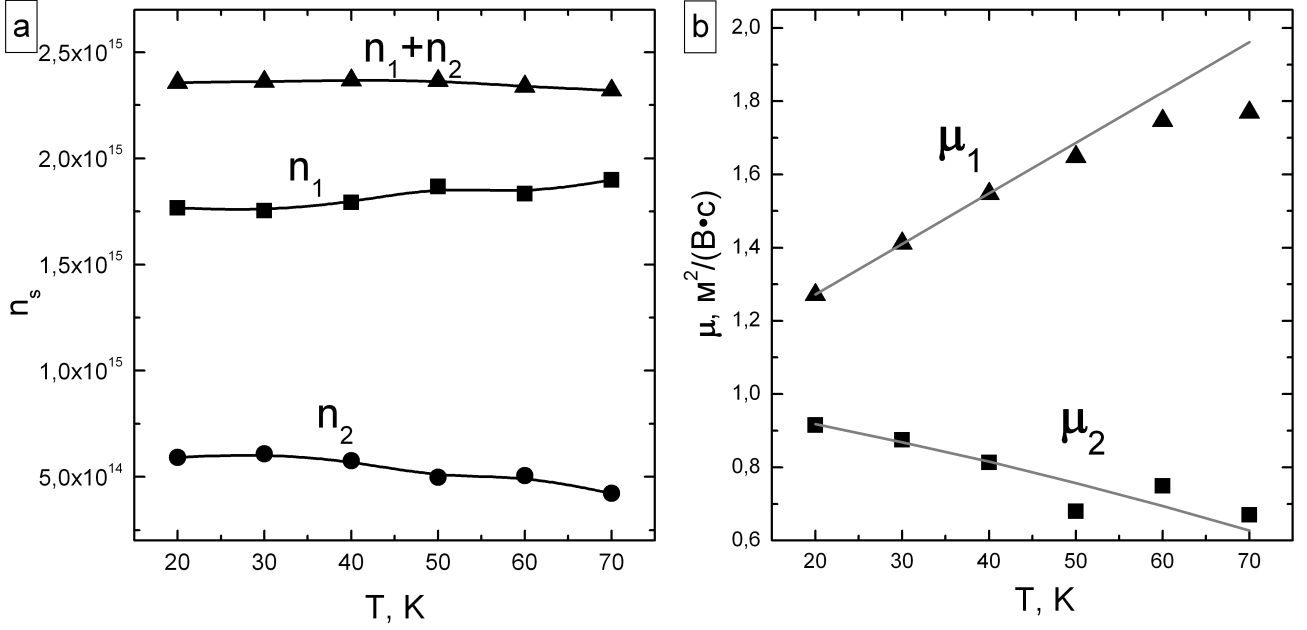


Рис. 9. [а] - Температурная зависимость концентрации носителей заряда в симметричной n_1 , антисимметричной n_2 подзонах пространственного квантования и их суммы. [б] - температурная зависимость подвижности носителей заряда в симметричной μ_1 , антисимметричной μ_2 подзонах пространственного квантования. Точками отмечены данные полученные из обработки эксперимента. Линиями построены теоретические зависимости.

гласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона [6].

Интересные результаты получены для подвижностей μ_1 и μ_2 электронов в двух подзонах: для нижней подзоны (бóльшая концентрация электронов) $\mu_1(T)$ растёт с ростом температуры T , а для верхней подзоны с меньшей концентрацией электронов $\mu_2(T)$ убывает с ростом T . Этот результат находится в соответствии с нашими представлениями о том, что зависимости $\mu_{1,2}(T)$ обусловлены вкладом в проводимость от межэлектронного взаимодействия в баллистическом режиме. Теоретическая обработка этих кривых даёт значения $F_0^\sigma = -0.14 \pm 0.2$ для нижней подзоны и $F_0^\sigma = -0.27 \pm 0.2$ для верхней подзоны в соответствии с тем, что температурная добавка к проводимости $\Delta\sigma_{ball}^{ee}$ меняет знак при $F_0^\sigma \simeq -0.25$ (см. (5)).

Пятая глава посвящена особенностям квантового эффекта Холла (КЭХ) в гетероструктурах $p - \text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ и $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$. В начале главы рассматриваются основные положения теории двухпараметрического скейлинга и теоретические представления о температурной зависимости перехода

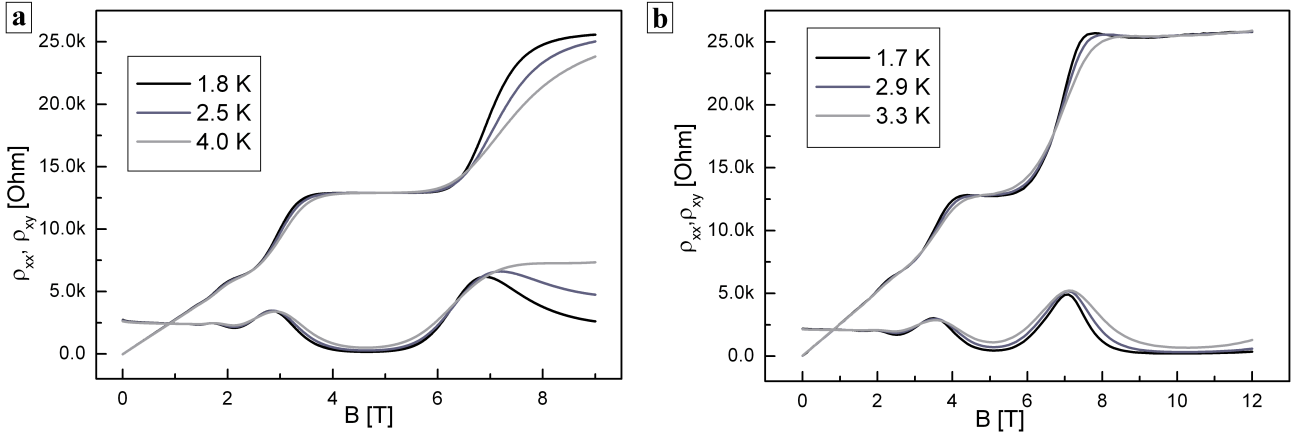


Рис. 10. [a] - Экспериментально полученные зависимости $\rho_{xx}(B)$ и $\rho_{xy}(B)$ для образца $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ при температурах 1.8, 2.5 и 4.0 K, [b] - зависимости $\rho_{xx}(B)$ и $\rho_{xy}(B)$ для образца $p - \text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ при температурах 1.7, 2.9 и 3.3 K

плато-плато в режиме КЭХ.

Режим КЭХ можно рассматривать как последовательность квантовых фазовых переходов изолятор-металл-изолятор при сканировании уровнем Ферми плотности состояний неупорядоченной 2D-системы в квантующем магнитном поле. В рамках данной концепции переход между соседними плато КЭХ, так же как ширина пиков на зависимости $\rho_{xx}(B)$, должны становиться всё уже и уже при понижении температуры. В рамках теории скейлинга [7] ширина перехода между i -м и $(i + 1)$ -м плато КЭХ должна стремиться к нулю по степенному закону:

$$\delta B_{i \rightarrow (i+1)} \sim T^\kappa, \quad (6)$$

здесь $\kappa = 1/z\nu$, $\nu = 7/3$ - критический индекс длины локализации, $z = 1$ - динамический критический индекс.

Нами была проведена серия экспериментов на образцах $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ для получения зависимостей $\rho_{xx}(B)$ и $\rho_{xy}(B)$ при фиксированных температурах (от 0,8 до 6 K) и магнитных полях до 9 Тл. Основная часть рассеивающего потенциала для гетероструктур $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ имеет короткодействующий характер (рассеяние на сплавном потенциале в ямах InGaAs). На рисунке 10а представлен пример полученных данных с использованием вставки He^4 . Из полученных экспериментальных данных была вычислена зависимость $\sigma_{xy}(B)$ и ширина перехода между первым и вторым плато КЭХ (ши-

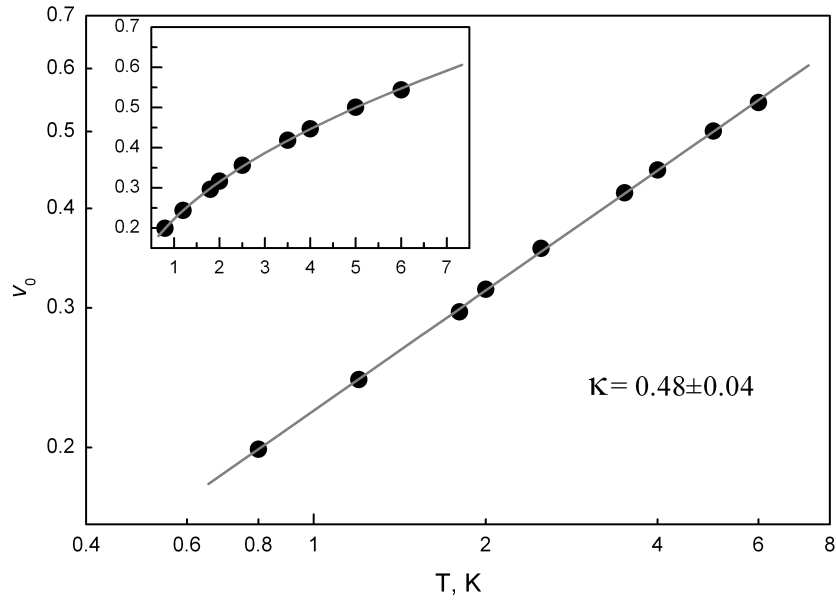


Рис. 11. Зависимость ширины полосы делокализованных состояний от температуры для образца $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ в двойном логарифмическом масштабе. На вставке та же самая зависимость в линейном масштабе.

рина полосы делокализованных состояний в спектре уровней Ландау $\nu_0(T)$). Полученная температурная зависимость ширины полосы делокализованных состояний (рис. 11) хорошо описывается с помощью степенной зависимости $\nu_0(T) \sim T^\kappa$ с показателем степени $\kappa = 0.48 \pm 0.4$, это значение близко к теоретическому значению 0,43 [7]. Отклонение от теоретического значения может быть обусловлено отличием характера рассеивающего потенциала от точечного.

На образцах $p - \text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ была проведена аналогичная серия экспериментов (рис. 10b). Из расчетов были получены качественно отличающиеся результаты. На рисунке 12 представлена зависимость ширины полосы делокализованных состояний от температуры в двойном логарифмическом (на вставке) и линейном масштабе для гетероструктуры $p\text{-Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$. В данном образце доминирующую роль играет крупномасштабный рассеивающий потенциал (рассеяние на удаленных ионизированных примесях в барьерах). Полученные экспериментальные данные хорошо описываются линейной зависимостью:

$$\nu_0(T) = \alpha T + \beta \quad (7)$$

с конечной шириной перехода даже при $T \rightarrow 0$ ($\beta = 0.076$).

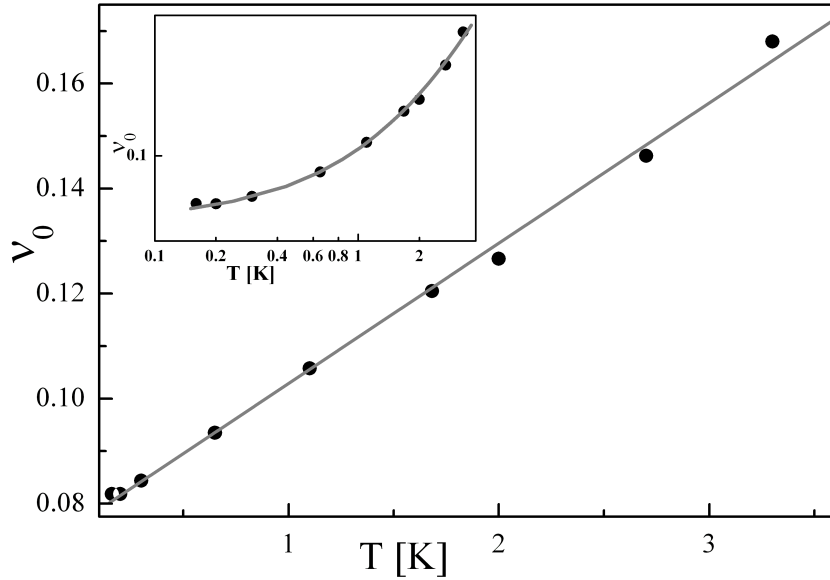


Рис. 12. Зависимость ширины полосы делокализованных состояний от температуры для образца $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$. На вставке та же самая зависимость, но в двойном логарифмическом масштабе

В работах [8,9] отмечена существенная роль *короткодействующего* случайного примесного потенциала для обнаружения скейлинговых зависимостей, тогда как крупномасштабный примесный потенциал значительно усложняет наблюдение критических квантовых явлений. В экспериментальной работе [9] при исследовании проводимости квантовых ям в гетероструктурах $Al_xGa_{1-x}As/Al_{0.33}Ga_{0.67}As$ с контролируемым короткодействующим сплавным потенциалом наблюдается универсальная скейлинговая зависимость с параметром $\kappa = 0.42 \pm 0.01$ для переходов плато-плато в области концентраций $0.0065 < x < 0.016$. При бóльших величинах x показатель степени увеличивается до $\kappa \sim 0.58$, это вызвано образованием кластеров атомов Al , изменением характера рассеивающего потенциала и, как следствие, отклонением от универсального скейлингового поведения.

Линейная по температуре зависимость ширины полосы делокализованных состояний $\nu_0(T)$ является квазиклассической по природе и должна наблюдаться именно в образцах с медленно меняющимся потенциалом. С другой стороны, влияние кулоновского взаимодействия на экранирование плавного примесного потенциала [10] приводит к уширению делокализованного состояния в центре подзоны Ландау и к конечной ширине перехода плато-плато

квантового эффекта Холла при $T \rightarrow 0$.

В разделе **Основные результаты** обобщены выводы работы:

1. В двумерной дырочной системе $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ с большой величиной g -фактора и, следовательно, сильным эффектом Зеемана проведено разделение квантовых интерференционных вкладов в проводимость от эффекта слабой локализации и от модифицированного беспорядком межэлектронного взаимодействия.
2. Показано, что аномальное поведение вклада в проводимость от межэлектронного взаимодействия в гетеросистемах $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$, соответствующее «антилокализации», обусловлено преобладанием вклада триплетного канала из-за большой величины параметра ферми-жидкостного взаимодействия.
3. В двумерной дырочной системе с проводимостью $\sigma \approx e^2/h$ обнаружена немонотонная температурная зависимость сопротивления (переход от локализации к «антилокализации» при понижении температуры) в качественном соответствии с предсказаниями современной теории ренорм-группы.
4. Показано, что положительное магнитосопротивление, наблюдаемое в гетероструктурах $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ с $\sigma \approx e^2/h$, обусловлено эффективным подавлением триплетного канала ферми-жидкостного взаимодействия вследствие сильного эффекта Зеемана.
5. В двумерной электронной системе $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ обнаружен существенный, линейный по температуре, рост подвижности носителей заряда, который связан с вкладом в проводимость от межэлектронного взаимодействия в баллистическом режиме.
6. В гетероструктурах $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ с двойными квантовыми ямами проведено разделение вкладов в проводимость от носителей тока двух заполненных подзон пространственного квантования: подзоны симмет-

ричных и антисимметричных состояний. Найдены параметры ферми-жидкостного взаимодействия для двух типов носителей заряда.

7. В режиме целочисленного квантового эффекта Холла в гетероструктурах $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ наблюдалось скейлинговое поведение ширины квантового фазового перехода плато-плато: $\nu_0(T) \sim T^\varkappa$ со значением критического индекса $\varkappa = 0.48 \pm 0.04$, что близко к теоретическому значению.
8. В системах $p - \text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ с преимущественно плавным примесным потенциалом наблюдается квазиклассическое поведение ширины перехода плато - плато: $\nu_0(T) = \alpha T + \beta$ с конечным уширением β даже при сверхнизких температурах. Теоретически такое поведение объясняется влиянием межэлектронного взаимодействия на экранирование флуктуаций плавного примесного потенциала.

Приложение А объясняет, почему в третьей главе мы не рассматриваем спин-орбитальное взаимодействие в качестве механизма, ответственного за антилокализационное поведение температурной зависимости сопротивления.

В **Приложении В** теоретически рассматривается зависимость сопротивления и коэффициента Холла от магнитного поля при наличии в проводимости вкладов от двух типов носителей заряда. Формулы, приведенные в данном приложении, использовались для анализа экспериментальных данных в четвертой главе.

Публикации

В ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:

- [A1] Y.G. Arapov, **I.V. Karskanov**, G.I. Harus, V.N. Neverov, N.G. Shelushinina, M.V. Yakunin. Magnetotransport in two-dimensional $n - \text{InGaAs}/\text{GaAs}$ double-quantum-well structures near the transition from the insulator to the quantum Hall effect regime. // Low Temperature Physics. 2009. T.35. C.32.

- [A2] Yu.G. Arapov, V.N. Neverov, G.I. Harus, N.G. Shelushinina, M.V. Yakunin, S.V. Gudina, **I.V. Karskanov**, O.A. Kuznetsov, A. de Visser, L. Ponomarenko. Transport properties of two-dimensional hole gas in a $Ge_{1-x}Si_x/Ge/Ge_{1-x}Si_x$ quantum well in a vicinity of metal-insulator transition. // Физика и техника полупроводников. 2007. Т.41. Выпуск 11. С.1333-1340.
- [A3] Yu.G. Arapov, G.I. Harus, **I.V. Karskanov**, V.N. Neverov, N.G. Shelushinina, M.V. Yakunin, O.A. Kuznetsov, L. Ponomarenko, A. de Visser. Quantum Hall effect in $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ heterostructures with low hole mobility. // Low Temperature Physics. 2007. Т.33. С.147.
- [A4] Y.G. Arapov, M.V. Yakunin, S.V. Gudina, **I.V. Karskanov**, V.N. Neverov, G.I. Harus, N.G. Shelushinina, S.M. Podgornykh, V.N. Zvonkov, E.A. Uskova. Features of quantum effects in two-dimensional $GaAs/n - InGaAs/GaAs$ structures with double quantum wells. // Low Temperature Physics. 2007. Т.33. С.156.
- [A5] Y.G. Arapov, S.V. Gudina, **I.V. Karskanov**, V.N. Neverov, G.I. Harus, N.G. Shelushinina. Contributions of the electron-electron interaction and weak localization to the conductance of $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ heterostructures. // Low Temperature Physics. 2007. Т.33. С.160.

Публикации в других изданиях:

- [A6] Yu. G. Arapov, G. I. Harus, **I.V. Karskanov**, V. N. Neverov, N. G. Shelushinina, M. V. Yakunin. Quantum Hall plateau-plateau transition in $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ and $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ heterostructures. // Тезисы докладов 17-й Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург - Новоуральск, 18-23 февраля 2008 г., С.72-73.
- [A7] Yu. G. Arapov, G. I. Harus, V. N. Neverov, **I.V. Karskanov**, N. G. Shelushinina. Localization and electron-electron interaction effects in

magnetoresistance of p-type $Ge/Ge_{1-x}Si_x$ heterostructures. // Тезисы докладов 17-й Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург - Новоуральск, 18-23 февраля 2008 г., С.80-82.

- [A8] Ю.Г. Арапов, Г.И. Харус, В.Н. Неверов, **И.В. Карсканов**, Н.Г. Шелушина, М.В. Якунин. Спектр уровней Ландау в наклонном магнитном поле. // Тезисы докладов 17-й Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург - Новоуральск, 18-23 февраля 2008 г., С.91-93.
- [A9] Ю.Г. Арапов, М.В. Якунин, **И.В. Карсканов**, В.Н. Неверов, Н.Г. Шелушина, Г.И. Харус, С.М. Подгорных. Определение туннельной щели в двойных квантовых ямах $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$. // Тезисы докладов 17-й Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург - Новоуральск, 18-23 февраля 2008 г., С.94-95.
- [A10] Ю.Г. Арапов, М.В. Якунин, **И.В. Карсканов**, В.Н. Неверов, Н.Г. Шелушина, Г.И. Харус, С.М. Подгорных. Определение туннельной щели в двойных квантовых ямах $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$. // VIII Российская конференция по физике полупроводников, "Полупроводники 2007". г.Екатеринбург, 30 сентября 2007 - 5 октября 2007. тезисы докладов, С.203.
- [A11] **И.В. Карсканов**, В.Н. Неверов М.В. Якунин, G. Galistu, A. de Visser. Скейлинг в режиме квантового эффекта Холла для двойных квантовых ям $InGaAs/GaAs$. // VIII Российская конференция по физике полупроводников, "Полупроводники 2007". г.Екатеринбург, 30 сентября 2007 - 5 октября 2007. тезисы докладов, С.223.
- [A12] Yu. G. Arapov, G. I. Harus, **I.V. Karskanov**, V. N. Neverov, N. G. Shelushinina, M. V. Yakunin. Quantum Hall plateau-plateau transition in $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ and $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ heterostructures. // 15th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". Novosibirsk, Russia, June

25-29, 2007. тезисы докладов, С.305-306.

- [A13] Yu. G. Arapov, G. I. Harus, **I.V. Karskanov**, V. N. Neverov, N. G. Shelushina, M. V. Yakunin, S. M. Podgornyh. Direct observation of the transition from the diffusive to the ballistic regime in a $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ and $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ quantum wells. // 15th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". Novosibirsk, Russia, June 25-29, 2007. тезисы докладов, С.323-324.
- [A14] Ю.Г.Арапов, М.В.Якунин, С.В.Гудина, **И.В. Карсканов**, В.Н.Неверов, Г.И.Харус, Н.Г.Шелушинина, С.М.Подгорных, Б.Н.Звонков. Влияние заселенности антисимметричных состояний в двойной квантовой яме на квантовые поправки к продольной и холловской проводимости $GaAs/InGaAs/GaAs$ наноструктур. // Труды 34-го Совещания по физике низких температур (НТ-34), Ростов-на-Дону, п. Лоо, 26-30 сентября 2006, т.2, С.80-81.
- [A15] Y.G. Arapov, G.I. Harus, **I.V. Karskanov**, V.N. Neverov, N.G. Shelushina, M.V. Yakunin, O.A. Kuznetsov, L.Ponomarenko, A.Visser, Quantum Hall effect in $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ heterostructures with low hole mobility. // Тезисы докладов 16-й Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург - Кыштым, 27 февраля - 4 марта 2006 г., С.106-107.
- [A16] **И.В. Карсканов**, В.Н. Неверов. Переход плато-плато в режиме квантового эффекта Холла в двойной квантовой яме $In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ // Молодежный семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, Екатеринбург, 27 ноября - 3 декабря 2006, Тезисы докладов, С.35.
- [A17] Ю.Г. Арапов, М.А. Гинс, **И.В. Карсканов**, В.Н. Неверов, Г.И. Харус, Н.Г. Шелушинина, М.В. Якунин. Переход плато-плато в режиме квантового эффекта Холла в гетероструктурах $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$. // Молодежный семинар по проблемам физики конденсированного состояния

вещества, Екатеринбург, 27 ноября - 3 декабря 2006, Тезисы докладов, С.20-21.

- [A18] **И.В. Карсканов**, Ю.Г. Арапов, С.В. Гудина, В.Н. Неверов, Шелушина Н.Г., Харус Г.И., Якунин М.В., Разделение вкладов электрон-электронного взаимодействия и слабой локализации в проводимость гетероструктур $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$. // Молодежный семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, Екатеринбург, 28 ноября - 4 декабря 2005, Тезисы докладов, С.31.

Список литературы

- [1] Altshuler B., Aronov A. Electron-Electron Interaction in Disorder System. Amsterdam, 1985.
- [2] Квантовый эффект Холла / Под ред. Р. Прендж, С. Гирвин. М.:Мир, 1989.
- [3] Houghton A., Senna J., Ying S. Magnetoresistance and hall effect of a disorder interacting two-dimensional electron gas // Phys. Rev. B. 1982. Vol. 25, no. 4. P. 2196.
- [4] Punnoose A., Finkel'stein A. M. Dilute electron gas near the metal-insulator transition: Role of valleys in silicon inversion layers // Phys. Rev. Lett. 2001. Dec. Vol. 88, no. 1. P. 016802.
- [5] Narozhny B. N., Zala G., Aleiner I. L. Interaction corrections at intermediate temperatures: Dephasing time // Phys. Rev. B. 2002. May. Vol. 65, no. 18. P. 180202.
- [6] Якунин М., Подгорных С., Неверов В. Магнитный пробой и квантовый магнитотранспорт с постоянным псевдоспином в наклонных магнитных полях в двойной квантовой яме $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ // ЖЭТФ. 2007. Т. 132, № 1. С. 241.

- [7] Huckestein B. Scaling theory of the integer quantum hall effect // Rev. Mod. Phys. 1995. Apr. Vol. 67, no. 2. Pp. 357–396.
- [8] Pruisken A., de Lang D., Ponomarenko L., de Visser A. Universal scaling results for the plateau-insulator transition in the quantum hall regime // Solid State Communications. 2006. Vol. 137, no. 10. Pp. 540 – 544.
- [9] Li W., Csáthy G. A., Tsui D. C. et al. Scaling and universality of integer quantum hall plateau-to-plateau transitions // Physical Review Letters. 2005. Vol. 94, no. 20. P. 206807.
- [10] Cooper N. R., Chalker J. T. Coulomb interactions and the integer quantum hall effect: Screening and transport // Phys. Rev. B. 1993. Aug. Vol. 48, no. 7. Pp. 4530–4544.

